



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Estudo da localização de n instalações fabris em um sistema logístico

Por,
Rodolfo Lisita Pinto

Brasília, 10 de julho de 2015.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Estudo da localização de n instalações fabris em um sistema logístico

POR,

Rodolfo Lisita Pinto

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Produção

Banca Examinadora

Prof. Sérgio Ronaldo Granemann, UnB/
EPR (Orientador)

Prof. Reinaldo Crispiniano Garcia, UnB/
EPR

Prof. João Carlos Felix, UnB/ EPR

Brasília, 09 de novembro de 2015.

Agradecimentos

À minha mãe, Maria Teresa, que me apoiou durante toda minha vida e me ensinou os verdadeiros e melhores valores humanos que eu poderia ter.

Ao meu pai e minha madrastra, Augusto e Luciana, que até hoje servem de exemplo de responsabilidade, determinação e equilíbrio.

Ao meu irmão, Diogo, meu maior mestre e amigo.

Ao professor orientador SergioGranemann, pelo empenho e atenção no auxílio da condução deste trabalho.

A todos aqueles que tive o prazer de encontrar em minhas experiências profissionais, nas diversas oportunidades que o mercado me deu, em especial aos tutores e amigos Francisco Ferreira, Júlio César Gomes, Juliano Marcelo Sonza, Dean Beresford e Vítor Craveiro. Obrigado pelo tempo dedicado e pelos diversos ensinamentos fornecidos.

Rodolfo Lisita Pinto

RESUMO

O cenário econômico atual está cada vez mais exigente quanto aos requerimentos de produção. Empresas estão continuamente buscando alternativas de aumentar suas receitas e reduzir seus custos, tanto fixos quanto variáveis. Nesse cenário, a logística mostra-se como um importante instrumento de aumento de eficiência e racionalização de operações. Uma das áreas que mais vem sendo discutidas no universo da logística é a localização de facilidades logísticas, decisão que compõe e define toda a operação logística de uma empresa. Sendo assim, o presente trabalho aborda os diversos aspectos que compõem o estudo de localização de unidades fabris, contemplando a revisão do estado da arte do tema de localização de facilidades logísticas, a revisão dos principais métodos quantitativos de multilocalização e o estudo de caso em uma empresa de blocos de pavimentação do Reino Unido.

Palavras-chave: Logística. Localização de fábricas. Custos de transporte.

ABSTRACT

The current economic scenario is increasing competitiveness and production constraints. Companies are constantly seeking alternatives to raise revenue and to decrease costs, both variable and fixed. On this scenario, logistics shows itself as an important actor of efficiency improvement and operational optimization. One of the areas included in the logistics field of study is facilities locations. That is a decision that include and define the role logistic operation of companies nowadays. This document approaches the different aspects considered on the study of facilities location, covering the state of art of facilities location, the main quantitative methods of multilocation and a case study of a block paving company from United Kingdom.

Key words: Logistics.Facility location.Haulage costs.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 OBJETIVO GERAL	11
1.2.1 Objetivos específicos	11
1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO.....	11
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 LOGÍSTICA.....	13
2.2 PERSPECTIVA HISTÓRICA DE LOCALIZAÇÃO DE FÁBRICAS.....	14
2.3 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES	16
2.3.1 Método de classificação dos fatores.....	17
2.3.2 Método do ponto de equilíbrio.....	19
2.3.3 Método do centro de gravidade.....	20
2.3.4 Método de múltiplo centro de gravidade	21
2.3.5 Problema de p medianas	22
2.3.6 Problemas de p centros	25
3 ESCOLHA DO MÉTODO E CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E APLICAÇÃO.....	29
3.1 ESCOLHA DO MÉTODO	29
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA	29
3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	31
3.3.1 Distâncias entre as localizações e os nós do sistema logístico.....	31
3.3.2 Demanda dos nós ³⁴	33
3.3.3 Custo de transporte.....	33
4 RESULTADOS.....	34
4.1 VALIDAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO ATUAL DAS FÁBRICAS.....	34
4.2 SUGESTÃO DE NOVA LOCALIZAÇÃO DE FÁBRICA	35
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXO A – Tabela de distancias entre as possíveis localizações e os nós do sistema logístico	39
ANEXO B – Demanda dos nós.....	43
ANEXO C – Procedimento de otimização do Solver	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito do peso dos produtos sobre o processo de localização antes e depois do processo produtivo	15
Figura 2 - Classificação dos Métodos de Localização de Facilidade	16
Figura 3 - Métodos de Localização de Facilidades	17
Figura 4 - Exemplo de ponto de equilíbrio	19
Figura 5 - Método de múltiplo centro de gravidade	22
Figura 6 - Rede de pontos de demanda e matriz de distâncias	23
Figura 7 - Custo total de cada nó	23
Figura 8 - Distâncias máximas de cada ponto	26
Figura 9 - Distâncias para $p=2$	27
Figura 10 - escolha do método a ser aplicado	29
Figura 11 - Mapa do Reino unido com as localizações atuais	30
Figura 12 - Maiores cidades da Inglaterra	31
Figura 13 – Possíveis localizações	32
Figura 14 - Consulta de uma das distancias na ferramenta <i>Google maps</i>	33
Figura 15 - Tela principal do <i>add-in</i>	44
Figura 16 - Tela preenchida de forma completa	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de aplicação do método de pontuação ponderada três locais...	18
Tabela 2 - Exemplo de aplicação do método do centro de gravidade.....	21
Tabela 3 - Valores de Kij atuais	34
Tabela 4 - Validação das localizações atuais.....	35
Tabela 5 - Sugestão de nova fábrica	36

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta considerações gerais iniciais do trabalho, tais como justificativa do estudo, objetivo do trabalho, contextualização do tema e objetivos do estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

O cenário econômico atual está cada vez mais exigente quanto aos requerimentos de produção. Empresas estão continuamente buscando alternativas para aumentar suas receitas e reduzir seus custos, tanto fixos quanto variáveis. Neste contexto, a logística tem grande importância, uma vez que abrange aspectos de fluxos de materiais e de informação por toda a cadeia de suprimento e tem influência direta nos custos de qualquer empresa.

Um dos problemas logísticos amplamente discutidos na literatura é a busca por pontos ótimos no espaço geográfico para localização de depósito de triagem e/ou de instalações de fábricas e centros de distribuição (Novaes, 1989). De acordo com Shimchi-Levi (2005), a decisão da localização de fábrica e/ou dos centros de distribuição para facilitar o atendimento à demanda de clientes é um dos mais importantes aspectos logísticos a serem discutidos na literatura.

Ballou (2006) explica que a localização geográfica dos pontos de estoque e de seus centros de abastecimento cria o esboço do plano logístico. É pela determinação do número, localizações e tamanho dessas instalações e pela atribuição de uma fatia de demanda que se estabelecem os caminhos pelos quais os produtos são direcionados ao mercado. Ainda de acordo com Ballou (2006), o escopo adequado da questão da localização das instalações se dará ao abranger os custos de toda a movimentação de produtos a partir da fábrica, vendedores ou locais intermediários de estoque até sua entrega ao cliente. Atender à demanda diretamente das fábricas, fornecedores ou pontos de estoque, ou direcioná-la por meio de pontos selecionados de armazenamento são elementos que pesam nos custos totais de distribuição. Assim, encontrar a alocação de custos mais baixa ou a alternativa de maior lucratividade é a essência da localização de instalações.

Paralelamente às definições de Ballou (2006), Moreira (2008) expõe que localizar significa determinar o local onde será a base de operação, onde serão

fabricados os produtos ou prestados os serviços e/ou onde se fará a administração do empreendimento.

Rocha (2008) defende que vários são os fatores que influem na localização de empresas. De acordo com o autor, os principais são: proximidade do cliente, proximidade das fontes de matéria-prima, aspecto logístico, aspectos fiscais, disponibilidade de mão de obra, suficiência de energia/combustível.

Já para Heizer (2001), os fatores que afetam as decisões de localização são a produtividade da mão de obra, taxas de câmbio, custos de transporte, legislação local, proximidade dos mercados e proximidade dos fornecedores.

Pode-se afirmar, então, que o estudo da localização se volta para a escolha do melhor local para instalar empresas, definida pelo menor curso total de instalação, operação e logística, considerando as estratégias estabelecidas pela organização. O estudo tanto pode analisar empresas instaladas e que, para crescerem, procuram mudar de local, como também empresas em formação e cuja localização precisa ser definida (Rocha, 2008).

1.2 OBJETIVO GERAL

Determinar a localização ótima de instalações fabris em um sistema logístico.

1.2.1 Objetivos específicos

- 1) Identificar os principais métodos de localização de facilidades logísticas;
- 2) Selecionar o mais adequado para aplicação em um sistema logístico;
- 3) Validar a localização atual das unidades fabris de um sistema logístico de acordo com o método selecionado e;
- 4) Sugerir uma nova localização para instalação de uma nova unidade fabril em um sistema logístico de acordo com o método selecionado.

1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos enunciados, os passos a serem seguidos no presente trabalho são:

- a) Revisão do estado da arte do tema “localização de facilidades logísticas”;
- b) Revisão dos métodos quantitativos de multilocalização;
- c) Seleção de um método para aplicação em um caso concreto;

- d) Estudo de caso com uma empresa de produtos de paisagismo do Reino Unido, com a aplicação do método selecionado;
- e) Comparação dos resultados encontrados com a localização real das unidades fabris da empresa.

Para realizar o estudo de caso, será necessário realizar um levantamento dos custos de transporte dentro do sistema logístico e demanda atual da empresa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos:

1. O primeiro capítulo apresenta uma visão geral do trabalho a ser realizado, justificando a execução do estudo e estabelecendo os objetivos da pesquisa.
2. O segundo capítulo apresenta o referencial teórico da teoria da localização e dos métodos quantitativos existentes.
3. O terceiro capítulo trata da escolha do método mais adequado para a aplicação, juntamente com a apresentação do sistema logístico que será utilizado no estudo de caso.
4. O quarto capítulo tratará do estudo de caso, com a aplicação do método de localização múltipla para o sistema logístico da empresa de produtos de paisagismo.
5. No quinto capítulo são tecidas as conclusões do trabalho e as recomendações para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo conceitua alguns termos importantes para o entendimento do trabalho e aborda os métodos de localização de fábrica encontrados na literatura.

2.1 LOGÍSTICA

O perfeito entendimento de logística e cadeia de suprimento tem sido reconhecidamente um fator de vantagem competitiva para as organizações que efetivamente entendem o seu papel estratégico (Bertaglia, 2003).

Ballou (2006) conceituou logística como sendo as atividades de movimentação e armazenagem que facilitam o escoamento de produtos desde o ponto de aquisição da matéria-prima até o ponto de consumo final, assim como dos fluxos de informação que colocam os produtos em movimento, com o propósito de providenciar níveis de serviço adequados aos clientes a um custo razoável.

Já para Martin Christopher (1997) logística é o processo de gerenciar estrategicamente a aquisição, movimentação e armazenagem de materiais, peças e produtos acabados (e os fluxos de informações correlatas) mediante a organização e de seus canais de *marketing*, de modo a poder maximizar as lucratividades presente e futura através do atendimento dos pedidos a baixo custo.

De acordo com o *Concil of Supply Chain Management Professionals – CSCMP*, as atividades da Gestão Logística incluem, tipicamente, a gestão dos transportes de entrada e saída, gestão de frotas, armazenagem, manuseamento de matérias, atendimento de pedidos (*orderfulfillment*), desenho da rede logística, gestão de inventário, planejamento da oferta e da procura e gestão dos fornecedores de serviços logísticos.

Com graus variáveis, a função logística também inclui o *sourcing* (processo de identificar uma empresa que fornece um produto ou serviço necessário) e o *procurement* (planejamento de compras, que envolvem todas as atividades ligadas a compra de produtos), planejamento e programação de produção, embalagem, montagem e serviço ao cliente. Está envolvida em todos os níveis de planejamento e execução – estratégico, operacional e tático.

A Gestão Logística é uma função integradora que coordena e otimiza todas as atividades logísticas, integrando também as atividades com outras funções, incluindo o *marketing*, as vendas, a produção, as finanças e as tecnologias da informação.

Em outras palavras e de forma simplista, logística é o conjunto de atividades envolvidas no transporte e na armazenagem de materiais, visando minimizar os custos e melhorar o nível de serviço prestado.

2.2 PERSPECTIVA HISTÓRICA DE LOCALIZAÇÃO DE FÁBRICAS

De acordo com Ballou (2006), a primeira referência sobre localização de instalações encontrada na literatura é do alemão Johann VonTHUNEN, em 1875. Thunen defendeu que a localização dos empreendimentos é regida pelo preço de venda dos produtos no mercado e pelo custo da terra à ser localizada a instalação. Em outras palavras, o lucro equivaleria à diferença entre o preço das mercadorias no mercado (atual preço de venda) e o custo de transportar esses bens até o mercado (custos de transporte). A atividade econômica, de acordo com Thunen, localizar-se-ia em torno do mercado, onde as distâncias variam de acordo com a capacidade do negócio de pagar pela terra. De acordo com Ballou (2006), ainda hoje a ideia de Thunen sustenta-se, na medida em que é observado o padrão das localizações de varejo, residência, manufatura e agricultura que cercam o centro urbano.

Outro autor que teve papel importante no desenvolvimento das teorias de localização de fábrica foi Alfred Weber, em 1909, também citado por Ballou (2006). Weber foi o primeiro autor a considerar o papel das matérias-primas no processo de produção, e percebeu que, de fato, o custo de transporte da matéria-prima poderia influenciar diretamente a decisão de instalação das facilidades. Weber começou a observar alguns fenômenos que eram até então desconsiderados, como, por exemplo, a perda de peso. Em alguns processos produtivos, a matéria-prima é mais pesada de ser transportada do que o produto final, em função de subprodutos inutilizáveis. Com essa ideia, Weber sugeriu que os pontos produtivos fossem localizados mais perto do local da matéria-prima, com vistas a diminuir o transporte dos subprodutos que não geram receita.

Ademais, Ballou (2006) relata que Weber também considerou que alguns produtos aumentam de peso depois de passar por todo o processo produtivo. O autor explica que esse cenário ocorre quando as ubiquidades entram no processo. Conforme Weber, as ubiquidades incluem as matérias-primas disponíveis por toda a

parte, como ar e água. Dessa forma, para os processos em que os produtos aumentam de peso, as facilidades devem ser instaladas mais perto do mercado consumidor, a fim de minimizar os custos de transporte dos bens mais pesados (produto final).

O último cenário considerado por Weber são os processos produtivos, que não aumentam nem diminuem o peso dos produtos, quando comparados às matérias-primas. Podem ser citadas como exemplo as montadoras de automóvel, nas quais o peso dos produtos finais (automóveis) corresponde à soma de cada uma de suas partes (matéria-prima).

A Figura 1, a seguir, resume o comportamento da localização de fábrica de acordo com o efeito do peso dos produtos nos processos produtivos.

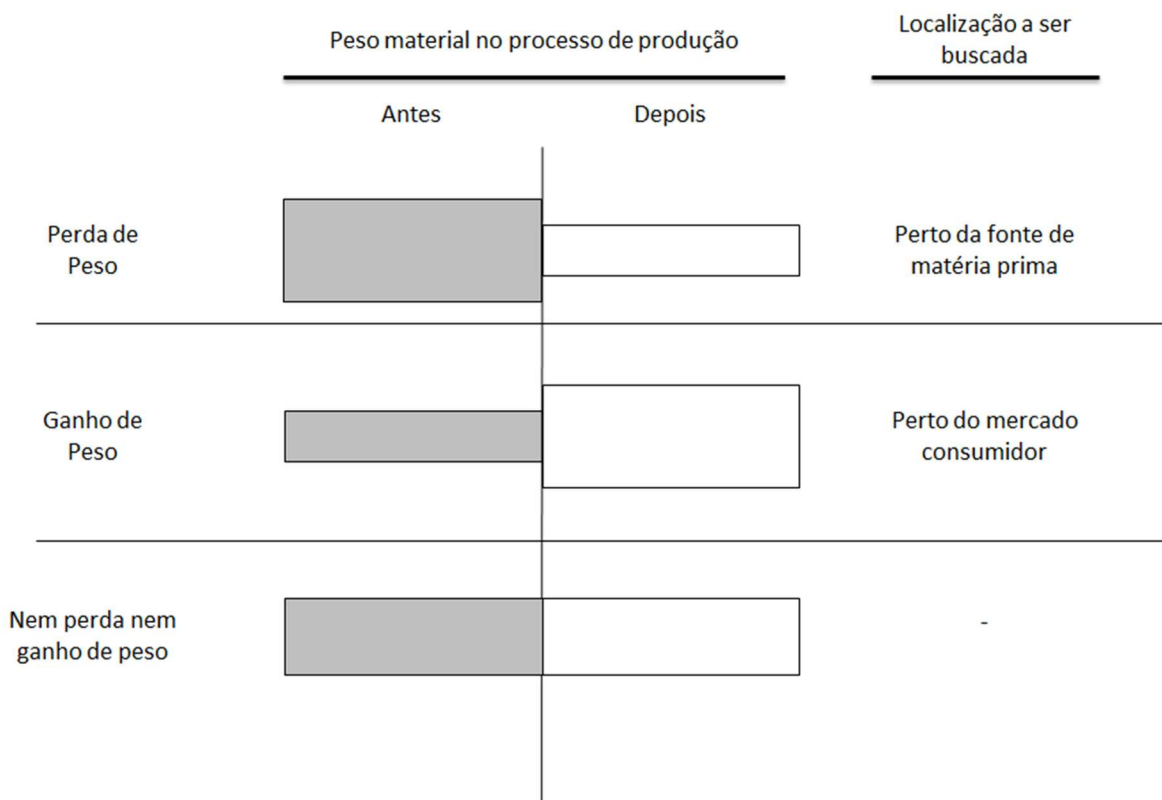


Figura 1 - Efeito do peso dos produtos sobre o processo de localização antes e depois do processo produtivo (Ballou, 2006)

Nos tópicos subsequentes, serão descritos os principais métodos quantitativos atuais encontrados na literatura para a tomada de decisão em instalações de fábricas.

2.3 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES

Ballou (2006) agrupa os métodos de localização de facilidades em dois grandes grupos:

- Localização de Instalação única (métodos que sugerem a localização de um ponto de instalação de facilidade);e
- Localização de Instalações Múltiplas (métodos que sugerem as localizações de diversos pontos de instalação de facilidades).

Dentro dos métodos de Instalações Múltiplas, Ballou (2006) ainda os estratifica em mais três grupos de métodos, de acordo com a Figura 2:

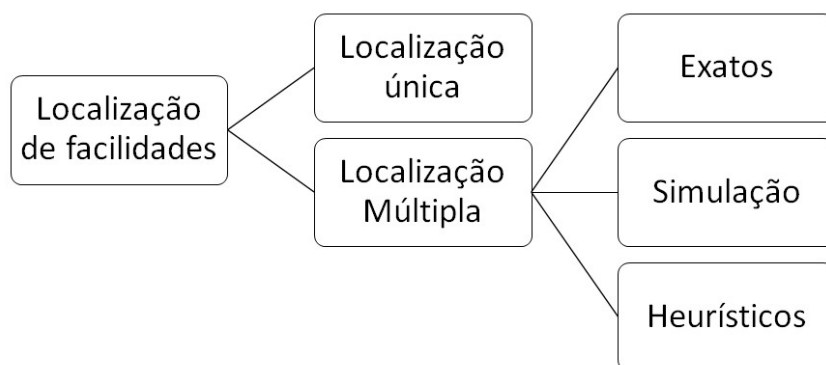


Figura 2 - Classificação dos Métodos de Localização de Facilidade

- **Métodos Exatos:** os métodos exatos são procedimentos com condições de garantir uma solução matemática ótima do problema de localização ou, no mínimo, uma solução de aceitável precisão.
- **Métodos de Simulação:** referem-se a uma representação matemática de um sistema logístico por demonstrações algébricas e lógicas manipuláveis em um computador. Realizam a simulação de vários sistemas logísticos, variando alguns aspectos que influenciam os custos, tais como modos de transporte, níveis de estoque, número de armazéns e disponibilidade do produto.
- **Métodos Heurísticos:** métodos que consideram as compensações dos diversos componentes dos custos logísticos, tais como custo fixo de armazém,

custo de transporte de insumos, custo de transporte de saídas, custo de manutenção de estoque. Em outras palavras, esses métodos procuram o custo mínimo através da compensação dos custos de armazenagem com os custos de transporte, variando de acordo com os locais de instalação das diversas facilidades.

A seguir serão detalhados seis dos principais métodos de localização de fábrica encontrados na literatura, sendo metade deles métodos de localização única e metade de localização múltipla. Para facilitar o entendimento desses métodos, torna-se interessante agrupá-los de acordo com a classificação sugerida acima:

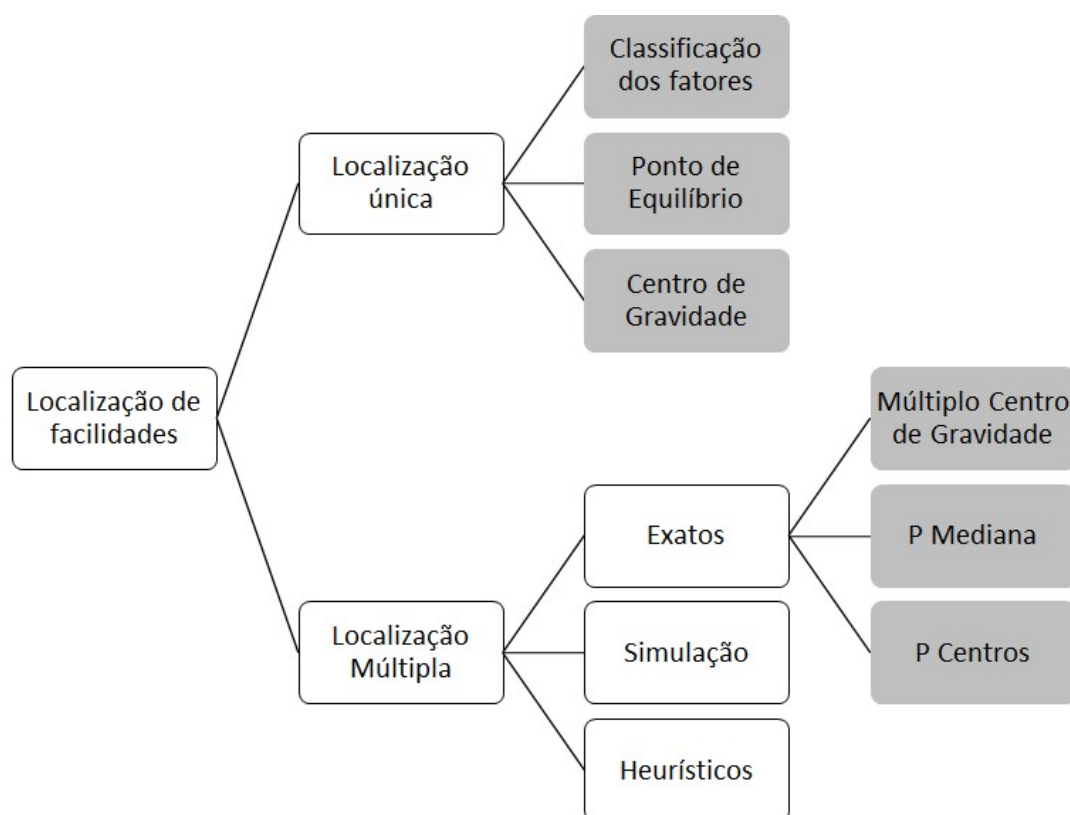


Figura 3 - Métodos de Localização de Facilidades

2.3.1 Método de classificação dos fatores

Uma das técnicas muito descritas na literatura é a de pontuação ponderada. Ela consiste na comparação entre possíveis pontos de instalação de fábrica, considerando todos os fatores que o tomador de decisão julgar pertinentes. O procedimento envolve, em primeiro lugar, a identificação de critérios que podem ser usados para avaliar as diversas localizações. Em segundo lugar, envolve a definição da importância relativa de cada critério e a atribuição de fatores de ponderação

(“pesos”) para cada um deles. O terceiro passo consiste em avaliar cada opção de localização segundo cada critério definido (SLACK et. al., 2009).

Em outras palavras, este método serve para comparar, de forma ponderada, pontos de localização de fábrica, considerando qualquer aspecto que o tomador de decisão entender que tenha influência sobre o local a ser escolhido.

Para a execução do método, é sugerido que se construa uma tabela contendo:

- os critérios de comparação entre os locais;
- a ponderação da importância de cada critério (peso);
- a pontuação de cada local de acordo com cada critério;
- a nota total de cada localização.

A Tabela 1, a seguir, exemplifica o método da pontuação ponderada:

Tabela 1 - Exemplo de aplicação do método de pontuação ponderada três locais

Critérios	Ponderação da Importância	Pontuação		
		Locais		
		A	B	C
Custo do local	4	80	65	60
Impostos Locais	2	20	50	80
Disponibilidade de mão de obra	1	80	60	40
Acesso a autoestradas	1	50	60	40
Acesso a aeroporto	1	20	60	70
Potencial expansão	1	75	40	55
Pontuação Ponderada Total		585	580	605

Fonte: Slack et al., 2009.

No exemplo acima, o Local C tem a melhor pontuação, provando ser o melhor local para a instalação da fábrica utilizando este método.

2.3.2 Método do ponto de equilíbrio

Heizer (2001) define o método do ponto de equilíbrio como sendo a utilização da análise de volume-custo para se fazer a comparação econômica das alternativas de localização. Identificando-se os custos fixos e variáveis e elaborando-se o gráfico deles para cada localização, pode-se determinar o local que proporciona o custo mais baixo para cada intervalo de volume produzido.

Em paralelo à definição de Heizer, Rocha (2008, p.64) defende que o método procura identificar a melhor localização a partir do conhecimento dos custos fixos e variáveis de cada local. Uma vez identificado o nível de atividade da empresa, o custo total (fixo + variável) é calculado para cada local.

Na Figura 4 está exemplificada a situação na qual a decisão de escolha de localização varia de acordo com o volume de vendas.

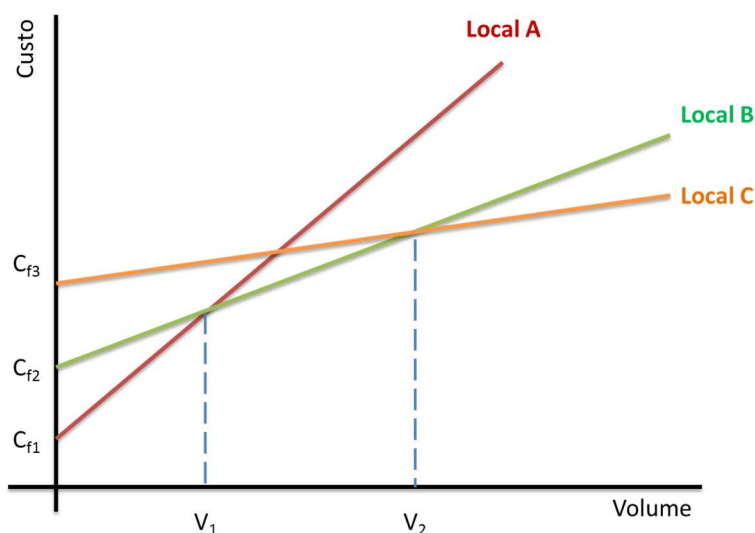


Figura 4 - Exemplo de ponto de equilíbrio¹

Note-se que o encontro de cada curva com o eixo de custo (Y) corresponde ao custo fixo de operação de cada um dos locais, e a inclinação da reta é dada em função do custo variável por unidade de cada local.

Para volumes até V_1 , o Local A se mostra como a opção mais barata, enquanto, para volume entre V_1 e V_2 , o Local B é o mais barato e, por fim, para volumes maiores que V_2 , o Local C se mostra como sendo a melhor opção.

¹(AUTOR, 2015)

2.3.3 Método do centro de gravidade

O método do centro de gravidade é usado para encontrar uma localização que minimize os custos de transporte (Slack et al., 2009). Ele baseia-se na ideia de que todas as localizações têm um custo de transporte diretamente proporcional às distâncias percorridas para recebimento de insumos (matérias-primas) e saídas (produtos). É importante ressaltar que este método considera também que o custo de transporte é proporcional à quantidade de bens movimentada nas viagens. Fazendo uma analogia física, esse método considera que a localização ótima seria o centro de gravidade de todos os pontos de origem e para o destino dos bens transportados (Slack et al., 2009).

Para a aplicação do método, deve-se criar um plano cartesiano imaginário, chamado de grade de referência, e plotar cada ponto de demanda (destino) / suprimento (fonte). Uma vez que se tem informação das coordenadas desses pontos, a localização ótima será dada pelo centro de gravidade da soma desses pontos, conforme mostram as Equações 1 e 2 abaixo:

$$X_g = \frac{\sum X_i V_i}{\sum V_i} \quad (1)$$

e

$$Y_g = \frac{\sum Y_i V_i}{\sum V_i} \quad (2)$$

Onde:

- X_i corresponde à coordenada x da fonte ou destino i;
- Y_i corresponde à coordenada y da fonte ou destino i;
- V_i corresponde ao volume transportado a ser enviada de ou para a fonte ou destino i.

Em outras palavras, este método defende que a localização ótima é dada pela média ponderada dos locais de consumo/suprimento de bens a serem transportados.

O exemplo a seguir ilustra a aplicação do método de centro de gravidade. As informações de demanda e localização das fontes e destinos encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2 - Exemplo de aplicação do método do centro de gravidade

	Quantidade de/até (V_i)	Coordenada geográfica (X_i, Y_i)
Fornecedor A	18	(5,12)
Fornecedor B	23	(9,7)
Cliente C	10	(14,2)
Cliente D	17	(7,4)
Cliente E	6	(4,12)
Cliente F	8	(6,8)
Total	82	

Fonte: (AUTOR, 2015)

Através da equação 1, tem-se que:

$$X_g = \frac{\sum X_i V_i}{\sum V_i} = \frac{(18 * 5) + (23 * 9) + (10 * 14) + (17 * 7) + (6 * 4) + (8 * 6)}{82} = 7,66$$

E através da equação 2 tem-se que:

$$Y_g = \frac{\sum Y_i V_i}{\sum V_i} = \frac{(18 * 12) + (23 * 7) + (10 * 2) + (17 * 4) + (6 * 12) + (8 * 8)}{82} = 7,33$$

O ponto ótimo da localização (centro de gravidade), nessa situação hipotética, é dado pelo ponto (7,66; 7,33).

2.3.4 Método de múltiplo centro de gravidade

A natureza do problema da localização de múltiplas instalações é vista quando se utiliza a abordagem do centro de gravidade exato num formato de multilocalizações (BALLOU, 2009).

Ballou (2006) explica que esse método é semelhante ao de localização única de centro de gravidade (abordado no item 0), porém existe a necessidade de dividir os diversos pontos de demanda em conglomerados, em número igual ao das instalações que se estiver localizando. Dessa forma, uma localização de centro de gravidade exato é encontrada para cada um dos conglomerados, conforme mostra a Figura 5:

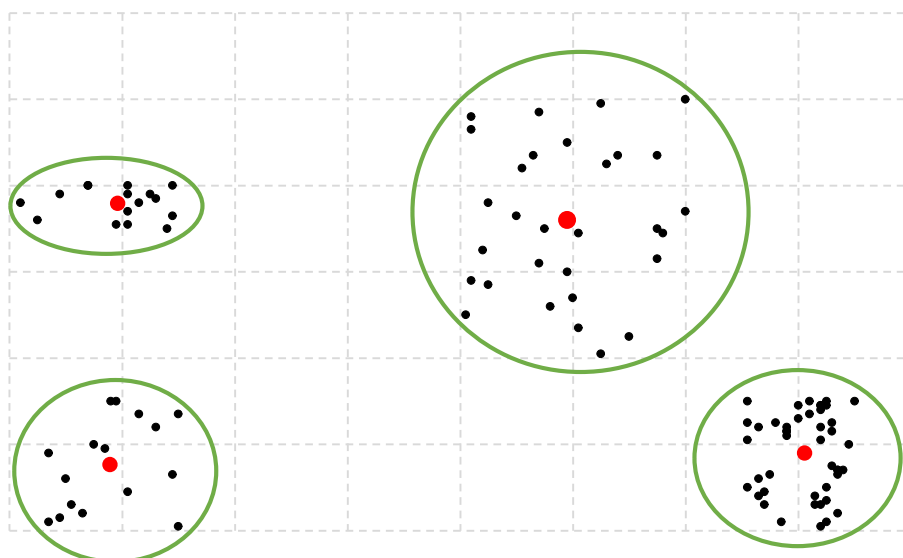


Figura 5 - Método de múltiplo centro de gravidade ²

Os pontos pretos representam pontos de demanda, os círculos verdes representam o conglomerado de pontos de demanda e os pontos vermelhos representam os centros de gravidade de cada conglomerado.

2.3.5 Problema de p medianas

O problema de p medianas é uma solução que calcula o ponto ótimo onde será instalada uma fábrica, dado uma malha de demanda existente e conhecida. Ela escolhe, dentre todos os pontos de demanda, qual seria o melhor ponto para ser instalada uma fábrica, visando ao menor custo de transporte possível para o atendimento de todos os outros pontos de demanda (CLEMENTE, 1992).

Em outras palavras, o problema de p medianas consiste em escolher um subconjunto de p localizações dentre os nós da rede, de forma a atender a todas as demandas de todos os clientes ao custo total mínimo (CLEMENTE, 1998).

Esse método considera que o custo total de distribuição é a soma de todos os custos de transporte do ponto a ser instalada a fábrica para cada ponto de demanda.

A Figura 6 a seguir exemplifica uma rede de distribuição a ser otimizada:

² (AUTOR, 2015)

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	0	8	12	13	8	9	4	7
B	8	0	8	14	11	14	9	4
C	12	8	0	6	11	15	10	5
D	13	14	6	0	5	10	9	10
E	8	11	11	5	0	5	4	7
F	9	14	15	10	5	0	5	10
G	4	9	10	9	4	5	0	5
H	7	4	5	10	7	10	5	0

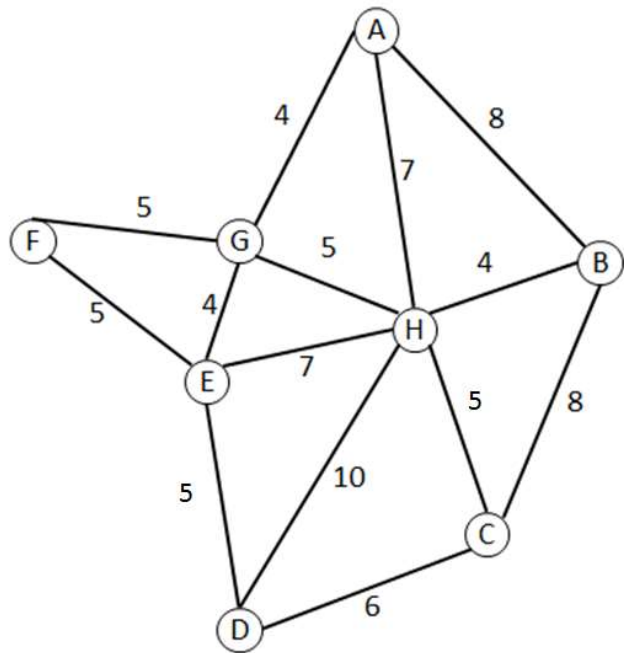


Figura 6 - Rede de pontos de demanda e matriz de distâncias (Clemente, 1998)

Neste exemplo, considere-se que cada nó no diagrama da direita represente um ponto de demanda, e a tabela da esquerda represente as distâncias entre todos os nós.

O custo total teórico para cada um dos nós é dado pela soma de cada uma das linhas (ou colunas), como mostrado na Figura 7 abaixo:

Localização	A	B	C	D	E	F	G	H
Custo Total	61	68	67	67	51	68	46	48

Figura 7 - Custo total de cada nó (Clemente, 1998)

Importante ressaltar que os custos considerados acima são dados pela distância entre os nós, e não levam em consideração ainda um custo unitário por unidade de distância.

Essa informação mostra o custo teórico de cada um dos pontos de demanda, caso uma fábrica seja instalada nesse ponto e atenda a todos os outros pontos. Neste exemplo, o ponto G seria a solução do problema.

É importante ressaltar que o exemplo acima, retirado de Clemente (1998), supôs que todos os pontos apresentavam demandas iguais, e o custo total considerou apenas a distância. Porém, temos que, em problemas práticos reais, essa simplificação evita que os problemas possam ser resolvidos com esse método. A

alternativa proposta pela literatura é que o custo total seja dado pela multiplicação da demanda pela distância, fazendo assim com que os pontos de maior demanda tenham maior peso na simulação. Ademais, esse método pode se tornar mais complicado quando se considera que mais de uma fábrica pode ser instalada, onde p pode variar de 1 até n, sendo n o número total de nós.

Dado o exemplo acima, é interessante apresentar a formulação matemática do método. O modelo P Mediana foi inicialmente formulado por Christofides (1975), conforme mostrado abaixo:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} w_j c k_{ij} \quad (3)$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^n k_{ij} = 1 \quad \forall i = 1 \dots m$$

$$\sum_{i=1}^m k_{ij} = p$$

$$k_{ij} \leq k_{ii} \quad \forall i = 1 \dots m \quad \forall j = 1 \dots n$$

$$k_{ij} \in \{0,1\}$$

Onde:

- N é o número de nós;
- M é a quantidade de possíveis localizações dentro do sistema logístico;
- P é o número de fábricas ou centros de distribuição a serem instalados;
- d_{ij} é a distância entre os nós i e j ;
- w_j é a demanda do nó j ;
- c é o custo unitário de transporte por quilômetro;
- k_{ij} é a variável de alocação, que será 1 se o nó x_j é alocado no nó x_i e 0 caso contrário. Em termos práticos, os nós que forem alocados com o valor 1 para essa variável serão os nós onde serão instaladas as unidades fabris.

A primeira restrição garante que um dado nó é alocado a somente um nó. A segunda restrição garante o número de medianas desejado. A terceira restrição garante que o ponto só esteja alocado à mediana, e a última restrição corresponde às condições de integralidade.

Vale ressaltar que, caso exista uma série histórica de valores de custos de transporte entre os pontos de demanda, existe a possibilidade de se substituir a matriz $[d_{ij}]$ por um valor médio entre esses custos. Em muitos casos, isso se mostra como uma boa adaptação do método, uma vez que existem outros fatores que influenciam os custos de transporte além da distância e da demanda, tais como qualidade da malha viária, trânsito, disponibilidade de veículos em cada região, tipos de veículo utilizados, etc.

2.3.6 Problemas de p centros

Os problemas de p centros são formulados a fim de encontrar a menor distância máxima entre as fábricas e os clientes. De acordo com Clemente (1998), os problemas de p centros são do tipo *minimax*: dadas p localizações de oferta, atribuir a cada ponto de demanda a cada uma delas de tal forma que a distância máxima total seja mínima.

Em outras palavras, este modelo simula as distâncias que seriam estabelecidas caso a escolha do local seja o ponto p de demanda para todas as opções de localização, e acusa como melhor opção a que apresenta a menor distância máxima.

De acordo com Clemente (1998), este método é comumente utilizado na localização de serviços públicos de emergência, como hospitais e bombeiros, casos em que o parâmetro p deve ser elevado o suficiente para que o tempo máximo de deslocamento entre qualquer ponto de demanda e o ponto de atendimento mais próximo não ultrapasse certo limite.

Para exemplificar esse método, considere-se a rede de pontos de demanda da Figura 8. As distâncias máximas de cada ponto são:

Localização	A	B	C	D	E	F	G	H
Distancia Máxima	13	14	15	14	11	15	10	10

Figura 8 - Distâncias máximas de cada ponto (Clemente, 1998)

De acordo com a Figura 8, observa-se que os pontos G e H se mostram igualmente como as melhores opções, pois apresentam a menor distância máxima.

Ademais, é possível ainda calcular as distâncias máximas nos casos em que é escolhido mais de um ponto para instalação da fábrica, e a distância considerada em cada ponto de demanda é a menor distância entre os p pontos selecionados como locais de instalação.

Por exemplo, considere-se que, para resolver o problema sugerido pela Figura 6, foi decidido que duas fábricas serão instaladas ($p = 2$), e as combinações a serem consideradas serão E, G e G, H. Nesse cenário, para cada um dos nós, tem-se então as seguintes distâncias máximas (Figura 9):

	E	G	H	Menor Custo (E,G)	Menor Custo (H,G)
A	8	4	7	4	4
B	11	9	4	9	4
C	11	10	5	10	5
D	5	9	10	5	9
E	0	4	7	0	4
F	5	5	10	5	5
G	4	0	5	0	0
H	7	5	0	5	0
Distância Máxima:				10	9

Figura 9 - Distâncias para $p=2$ ³

É possível concluir que, ao comparar esses dois pares de localização, GH seja preferível segundo o critério de centralidade, pois apresenta a menor distância máxima. É importante ressaltar que esse tipo de simulação pode ser realizado para $p = 3$, $p=4$, etc., com a utilização de um computador, de forma que todas as combinações podem ser simuladas de maneira fácil e a melhor combinação possível pode ser calculada.

Dado o exemplo acima, vale apresentar a formulação matemática do método. De acordo com Cunha (2006), o método dos p centros pode ser formulado de acordo com as expressões a seguir:

³(CLEMENTE, 1998, p. 136)

$$\text{Minimizar } Z = D \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} y_j = p$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J$$

$$D \geq \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in I$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J$$

Na formulação acima, a função objetivo (equação 4) corresponde à minimização da distância máxima D . A primeira restrição impõe que p instalações devem ser escolhidas, enquanto a segunda restrição assegura que cada nó i esteja alocado a exatamente uma instalação escolhida. A terceira restrição restringe a alocação dos nós a instalações selecionadas, e a quarta restrição define o limitante inferior para o valor de D , que está sendo minimizado. As duas últimas restrições definem os respectivos domínios das variáveis de decisão.

3 ESCOLHA DO MÉTODO E CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E APLICAÇÃO

Este capítulo descreve a escolha do método a ser aplicado no sistema logístico e caracteriza a empresa, detalhando as principais características relevantes para esse estudo.

3.1 ESCOLHA DO MÉTODO

A escolha do método mais adequado a ser aplicado foi feita a partir de uma classificação com os principais fatores que diferenciam os métodos explicados. Para esse estudo, os principais fatores considerados foram complexidade, precisão do resultado, disponibilidade de informações e aplicabilidade do método na empresa em questão. Cada um dos métodos detalhados no referencial teórico foi classificado dentro desses fatores e, ao final, pôde concluir-se qual método mais adequado a ser aplicado no estudo de caso.

	Complexidade	Precisão	Disponibilidade de Informações	Aplicabilidade	Total
Classificação dos fatores	1	1	5	1	8
Ponto de Equilíbrio	1	2	5	1	9
Centro de Gravidade	3	2	5	1	11
Múltiplo Centro de Gravidade	4	3	5	3	15
Problema de P Medianas	5	5	5	5	20
Problema de P Centros	5	4	5	3	17

Figura 10 - escolha do método a ser aplicado

Optou-se então pela aplicação do método das p medianas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa é uma fabricante de produtos de paisagismo. A empresa tem, atualmente, cinco sites de produção. Cada local têm suas peculiaridades e características, como a capacidade de produção, capacidade de estoque, diferentes custos fixos e variáveis e linhas de produção de produtos específicos. Diante desse cenário, a empresa enfrenta um grande desafio de manter o custo de produção e distribuição o mais baixo possível, visando oferecer os produtos para cada cliente a

partir do local de produção mais barato, levando em consideração os custos de produção e de transporte, fixos e variáveis.

A variedade de produtos inclui blocos de concreto de pavimentação, bandeiras de pavimentação, lajes de pavimentação, pedra natural e outros. O principal produto da empresa é o CBP (do inglês “*Concrete Block Paving*” - blocos de concreto de pavimentação), que representa a maior parte das vendas da empresa. Ele será objeto de estudo deste trabalho.

Atualmente, o CBP é produzido em três dos seus cinco sites de produção, localizados em BarrowUpon Soar (BW), Poole (PL) e Cliffe (CL) (Figura 11).



Figura 11 - Mapa do Reino unido com as localizações atuais ⁴

Ate hoje, a empresa ainda não realizou nenhum estudo a respeito da localização desses sites, visto que eles foram instalados de forma arbitraria e de acordo com a experiência dos gerentes na época.

⁴ (AUTOR, 2015)

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS

Ao analisar a Equação 3, observa-se que a aplicação do problema das p medianas exige três informações na função objetivo:

- 1) Distâncias entre as possíveis localizações e os nós do sistema logístico (d_{ij});
- 2) Demanda de todos os nós do sistema logístico (w_j) e;
- 3) Custo unitário de transporte, em libras (c).

A seguir será detalhada a coleta de cada uma das duas informações.

3.3.1 Distâncias entre as localizações e os nós do sistema logístico

O primeiro passo para o levantamento das informações da distâncias foi a definição das possíveis localizações das fábricas. Por orientação da empresa estudada, optou-se por considerar como as possíveis localizações a serem instaladas as 10 maiores cidades do Reino Unido, mostradas na Figura 12, acrescidas as localizações das 3 fábricas que produzem o CBP já instaladas.

Cities, towns & districts	Population
London	7,074,265
Birmingham	1,020,589
Leeds	726,939
Glasgow	616,430
Sheffield	530,375
Bradford	483,422
Liverpool	467,995
Edinburgh	448,850
Manchester	430,818
Bristol	399,633

Figura 12 - Maiores cidades da Inglaterra⁵

Temos que as cidades de Bradford e Leeds, ambas presentes na lista das 10 maiores cidades, são muito próximas (18km) e, por conveniência, foi considerada apenas a cidade de Leeds na simulação.

Após a definição dos possíveis pontos de demanda, foi necessário o levantamento dos nós do sistema logístico, ou seja, dos pontos de demanda. Para isso, decidiu-se utilizar como pontos de demanda as áreas de código postais (*post*

⁵ Fonte: <<http://www.citymayors.com/>> Acesso em: 4 nov. 2015.

code areas) do Reino Unido. A Figura 13 ilustra a divisão do Reino Unido nas áreas de códigos postais, as 9 cidades consideradas e as 3 localizações das fábricas atuais.

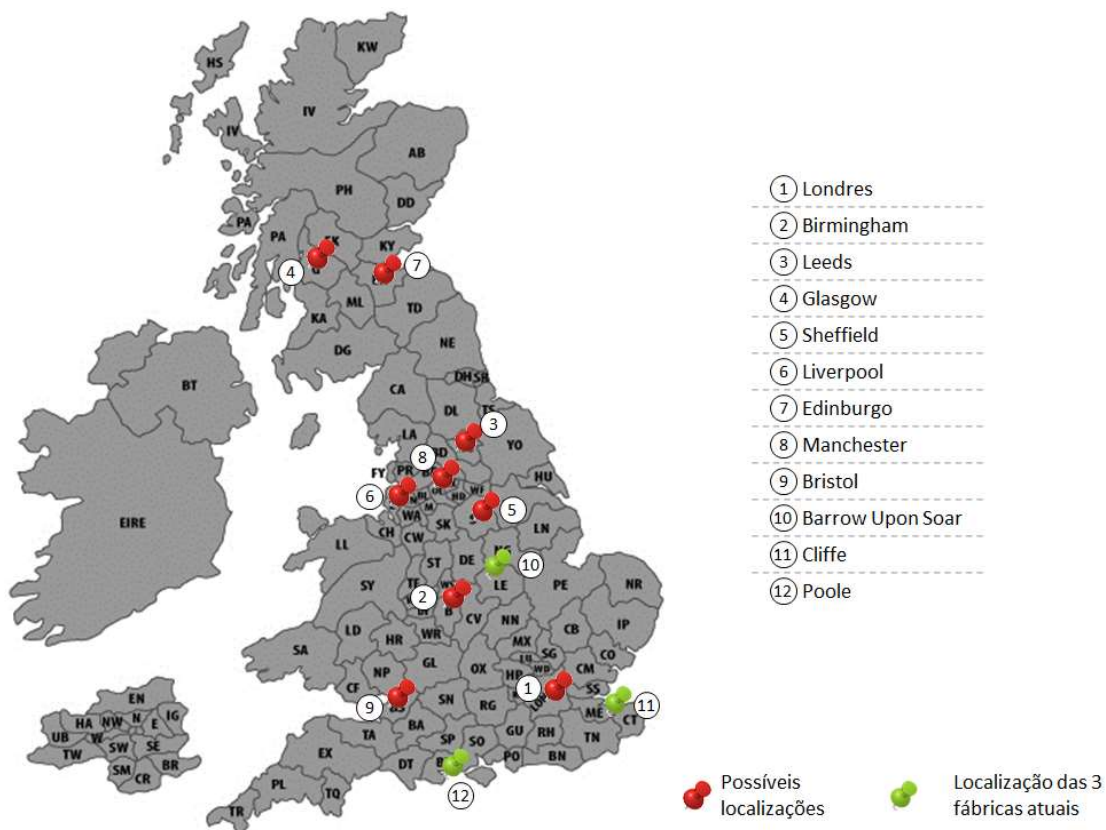


Figura 13 – Possíveis localizações⁶

Uma vez definidos os nós e as possíveis localizações, o próximo passo foi o levantamento das distâncias entre cada uma das possibilidades de possível localização e nó.

A Figura 14 abaixo exemplifica o procedimento da coleta da informação de distância entre as possíveis localizações e os nós do sistema logístico. O levantamento foi feito com o auxílio da ferramenta *google maps*, e como exemplo foi consultado a distância entre a localização atual de uma das fábricas (Barrow Upon Soar) até o nó AB (Aberdeen).

⁶ (AUTOR, 2015)

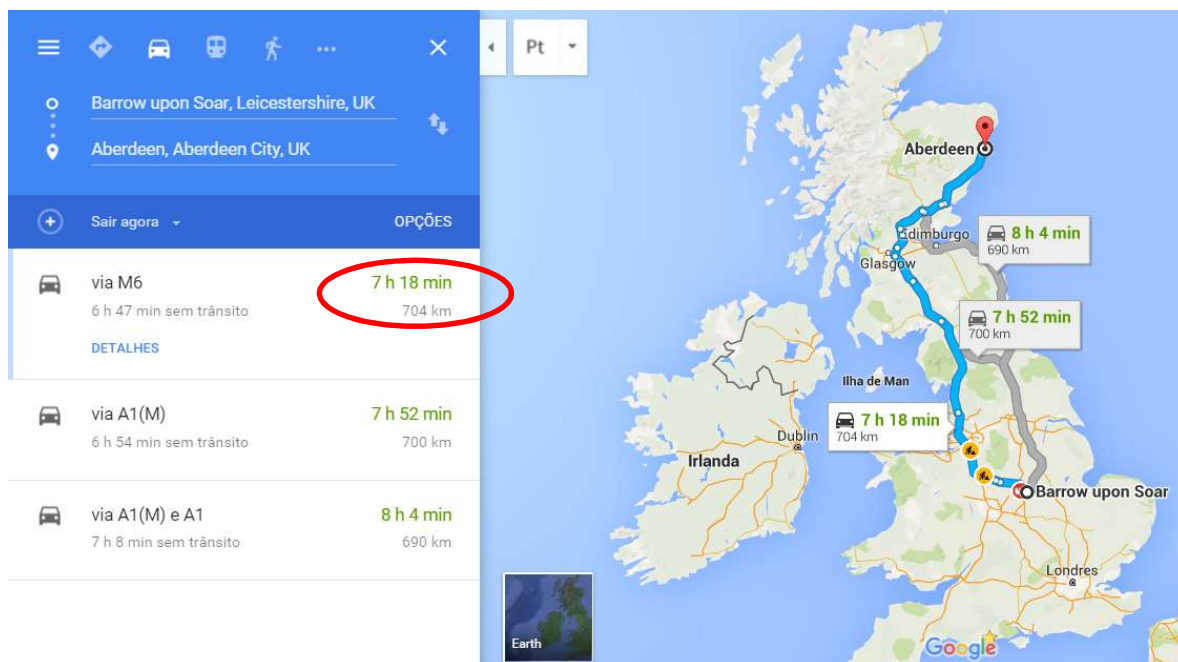


Figura 14 - Consulta de uma das distâncias na ferramenta *Google maps*

A tabela completa de distâncias pode ser encontrada no Anexo A.

3.3.2 Demanda dos nós

Uma vez definidos os nós do sistema logístico, a demanda do país foi agrupada nessas áreas. A empresa estudada forneceu as informações de demanda de cada um dos nós. A informação completa das demandas de cada um dos nós pode ser encontradas no ANEXO B.

3.3.3 Custo de transporte

O custo unitário de transporte considerado na formulação matemática foi fornecido pela empresa, através da média histórica de custo/tonelada/quilômetro.

Custo/tonelada/quilômetro
£ 0,08

4 RESULTADOS

Antes de apresentar os resultados encontrados, é importante citar os atuais custos de transporte do sistema logístico, considerando as três localizações atuais das fábricas, situação ilustrada na Tabela 3.

Uma vez que as localizações atuais das fábricas estão nas cidades de Barrow Uppon Soar, Cliffe e Poole, os valores de k_{ij} associadas para cada uma dessas localizações é 1.

Tabela 3 - Valores de k_{ij} atuais

Localização	k_{ij}
Barrow Uppon Soar	1
Cliffe, Medway, UK	1
Poole	1
Londres	0
Birmingham, UK	0
Glasgow	0
Liverpool	0
Edinburgh	0
Leeds	0
Sheffield	0
Manchester	0
Bristol	0

Aplicando a formulação matemática proposta na Equação 3, o custo total de transporte é **2.716.301,18 libras.**

4.1 VALIDAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO ATUAL DAS FÁBRICAS

O procedimento descrito neste tópico visa apontar três localizações que, de forma conjunta, apresentam o menor custo mínimo do sistema logístico. O cálculo matemático foi realizado com o auxílio do Microsoft Excel, mais especificamente do add-in Solver. O detalhe da utilização dessas ferramentas está no Anexo C.

Foram consideradas os seguintes valores para as variáveis no cálculo de otimização da Equação 3:

- $N = 114$ (quantidade de nós do sistema logístico);
- $M = 12$ (quantidade de opções de localizações);
- $P = 3$ (quantidade de localizações a serem apontadas pelo cálculo);
- d_{ij} : valores da tabela do Anexo ;
- w_j : valores da tabela do Anexo B;
- $c = £ 0,08$.

A Tabela 4 aponta os resultados da variável k_{ij} . Esse resultado indica os pontos onde, teoricamente, o sistema de transporte teria o menor custo total. As localizações a serem instaladas as fábricas recebem o valor de 1, e as demais o valor de 0:

Tabela 4 - Validação das localizações atuais

Localização	k_{ij}
BarrowUppon Soar	1
Cliffe, Medway, UK	0
Poole	1
Londres	1
Birmingham, UK	0
Glasgow	0
Liverpool	0
Edinburgh	0
Leeds	0
Sheffield	0
Manchester	0
Bristol	0

Custo Mínimo: 2.302.520,22 libras.

A Tabela 4 indica que os três pontos a que a simulação sugere que devem ser instaladas as fábricas são Barrow Uppon Soar, Poole e Londres (localizações onde a variável $k_{ij} = 1$). Importante ressaltar que duas dessas localizações já possuem fábricas instaladas, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Em outras palavras, verifica-se que a diferença entre as localizações atuais e as localizações sugeridas pelo cálculo de otimização é de apenas um dos 3 locais. O cálculo de otimização sugere a substituição da localização da fábrica de Cliffe por uma fábrica na cidade de Londres. Isso proporcionará, teoricamente, uma redução de £413.780,95, economia que reduz o custo inicial em aproximadamente 15%.

É importante ressaltar que Cliffe e Londres são cidades próximas (aproximadamente 57 km).

4.2 SUGESTÃO DE NOVA LOCALIZAÇÃO DE FÁBRICA

O procedimento neste tópico visa apontar uma nova localização a ser instalada uma fábrica, considerando as fábricas já existentes.

Para isso, foram alterados os valores de algumas variáveis a serem utilizadas na Equação 3:

- $N = 114$ (quantidade de nós do sistema logístico);
- $M = 12$ (quantidade de opções de localizações);

- $P = 4$ (quantidade de localizações a serem apontadas pelo cálculo);
- d_{ij} : valores da tabela do anexo A;
- w_j : valores da tabela do anexo B;
- $c = £ 0,08$;
- $K_{ij} = 1$ para $i=1,2,3$ (restrição que garante que as 3 atuais localizações das fábricas não podem ser alteradas).

A solução do problema considerou que existem três localizações permanentes, e sugere uma nova localização que, de forma conjunta com as três localizações já existentes, indica o menor custo mínimo.

Assim como no primeiro cálculo de otimização, os resultados são gerados através da definição da variável k_{ij} para cada um dos nós. O cálculo associará o valor de 1 para a variável k_{ij} da localização que aponta o custo mínimo e 0 para as demais.

O resultado é apontado na Tabela 5:

Tabela 5 - Sugestão de nova fábrica

Localização	k_{ij}
BarrowUpon Soar	1
Cliffe, Medway, UK	1
Poole	1
Londres	1
Birmingham, UK	0
Glasgow	0
Liverpool	0
Edinburgh	0
Leeds	0
Sheffield	0
Manchester	0
Bristol	0

A Tabela 5 aponta que, teoricamente, Londres é a localização que proporciona o menor custo mínimo total considerando as outras 3 fábricas já instaladas, uma vez que foi a localização que teve o valor 1 para a variável k_{ij} . Sendo assim, o custo total teórico proposto pelo cálculo é: £2.212.814,48. Isso proporcionaria, teoricamente, uma redução de custos de £503.486,69, representando uma redução de 19% do custo atual.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados alguns dos principais métodos utilizados para determinar a localização ótima de facilidades de produção, tendo sido aplicado aquele considerado o mais adequado de acordo com as especificidades do estudo de caso em questão. Os resultados encontrados neste trabalho comprovam que, de fato, a decisão da localização da fábrica é relevante para as empresas, tanto no aspecto econômico quanto no logístico.

Na primeira otimização calculada, o resultado sugere uma economia de 413.780,95 libras, através da substituição da fábrica localizada em Cliffe por uma em Londres. Em termos práticos, esse resultado é satisfatório, uma vez que as duas localidades (atual e sugerida) são bem próximas (aproximadamente 57 km). Além disso, temos que a concentração da demanda nos pontos perto de Londres é muito alta devido ao fato de que Londres é um dos maiores polos consumidores do país. Essa alta demanda faz com que o “peso” dos nós perto dessa localidade seja alto.

Sendo assim, considera-se válida a sugestão encontrada, o que referenda os dados da localização real das unidades da empresa em estudo.

A segunda otimização calculada sugere, potencialmente, uma economia de 503.486,69 libras através da instalação de uma nova fábrica em Londres. Esse resultado está alinhado com o resultado da primeira. Novamente, entende-se que o resultado é válido, pelos mesmos motivos já explicados.

Sendo assim, entende-se que os dois resultados obtidos satisfazem os objetivos propostos do trabalho.

Ademais, é importante ressaltar que, por ser um método exclusivamente quantitativo, os procedimentos aqui apresentados buscam minimizar os custos de transporte, e não levam em consideração os diversos aspectos qualitativos discutidos no estudo (mão de obra, legislação local, infraestrutura, etc.) que influenciam a tomada de decisão da localização das facilidades. Além disso, existem diversas melhorias que poderiam ser atribuídas, para este estudo de caso específico, no cálculo da otimização. Por exemplo, o método utilizado para a otimização das localizações não considera restrições de capacidade de produção para cada uma das fábricas, tampouco a variação dos custos fixos entre as localizações, aspectos que apresentariam grande influência matemática na formulação do problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLOU, Ronald H. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BERTAGLIA, Paulo R. *Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento*. São Paulo: Saraiva, 2003.

CHRISTOFIDES, N. *Graph theory: an algorithmic approach*. Londres: Academic Press, 1975.

PECK, Helen. *Marketing logistics*. Oxford: Butterworth Heinemann em nome do Chartered Institute of Marketing, 1997.

CLEMENTE, A.; FERNANDES, E. Planejamento e projetos. In: CLEMENTE A. (Org.) *Projetos empresariais e públicos*. São Paulo: Atlas, 1998

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS – CSCMP
Disponível em: <<https://cscmp.org/>>. . Acesso em: 6 jul. 2015.

HEIZER, J.; RENDER, B. *Administração de operações: bens e serviços*. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

NOVAES, Antonio Galvão. *Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos*. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

PIRES, Silvio R.I. *Gestão da cadeia de suprimentos (supply chain management): conceitos, práticas e*. São Paulo: Atlas, 2004.

ROCHA, D. R. da. *Gestão da produção e operações*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

SIMCHI-LEVI, D., X. Chen and J. Bramel. *The logic of logistics: theory, algorithms and applications for logistics management*. 2. ed. Springer, 2005.

SLACK, Nigel. CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON Robert. Tradução de Henrique Luiz Corrêa. *Administração da produção*. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2009.

MOREIRA, D. A. *Administração da Produção e Operações*. 2. ed. Cengage. 2008.

ANEXO A – Tabela de distâncias entre as possíveis localizações e os nós do sistema logístico

	BarrowwUppon Soar	Cliffe	Poole	London	Birmingham	Glasgow	Liverpool	Edinburgh	Leeds	Sheffield	Manchester	Bristol
AB	703,729	901,382	954,085	877,276	680,644	234,061	567,029	203,444	574,455	621,33	563,784	811,889
AL	151,379	102,047	211,994	41,368	160,62	602,321	312,824	600,162	273,893	233,878	306,573	222,493
B	77,356	305,491	332,611	255,793	59,161	428,02	120,703	430,651	177,355	119,672	114,452	190,415
BA	243,665	269,234	92,158	184,774	176,335	617,474	310,157	620,105	354,511	309,778	303,906	21,85
BB	195,393	418,638	445,758	368,94	172,307	294,789	58,693	297,42	111,408	119,407	58,489	303,561
BD	173,105	374,698	459,816	350,239	210,404	325,207	112,378	327,838	18,649	74,103	66,777	341,658
BH	298,283	234,96	8,854	173,12	274,636	734,088	426,771	736,719	438,247	393,514	420,52	121,731
BL	167,327	390,571	417,691	340,873	144,241	359,152	74,726	361,783	72,33	54,318	7,072	275,495
BN	281,311	117,478	162,029	85,913	284,692	744,144	436,827	746,775	424,674	370,604	430,576	266,814
BR	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
BS	224,33	274,506	110,586	190,046	157	598,139	290,822	600,77	335,176	290,443	284,571	0
CA	303,845	511,036	554,21	477,392	280,76	198,032	167,145	200,663	184,109	230,984	163,9	412,014
CB	129,83	127,104	269,748	102,645	160,069	569,135	312,272	566,976	240,707	200,692	306,021	280,247
CF	280,143	350,471	204,591	266,012	212,813	653,952	346,635	656,583	390,989	346,256	340,384	94,33
CH	140,889	364,134	391,254	314,436	117,803	366,788	59,765	369,419	116,123	103,333	46,776	249,057
CM	218,17	68,563	255,522	65,69	227,412	636,2	379,616	634,041	307,772	267,757	373,365	266,02
CO	218,17	68,563	255,522	65,69	227,412	636,2	379,616	634,041	307,772	267,757	373,365	266,02
CR	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
CT	249,662	25,963	228,308	61,221	279,145	692,049	431,28	689,89	363,621	323,606	425,029	261,267
CV	71,924	209,194	227,344	150,526	67,042	526,494	219,177	529,125	205,95	161,217	212,926	169,099
CW	140,889	364,134	391,254	314,436	117,803	366,788	59,765	369,419	116,123	103,333	46,776	249,057
DA	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
DD	600,84	798,493	851,205	774,387	577,755	131,172	464,14	100,555	471,566	518,441	460,895	709,009
DE	41,032	271,665	326,274	207,786	73,831	454,793	147,475	457,424	120,888	76,155	141,225	216,947
DG	387,671	585,324	638,036	561,218	364,586	123,12	250,971	125,751	258,397	305,272	247,726	495,84
DH	267,328	468,921	562,93	444,462	310,487	261,391	258,601	223,764	141,994	188,869	213	453,603
DL	264,039	465,632	559,641	441,173	307,198	252,072	213,61	186,04	138,705	185,58	209,711	450,314
DN	144,497	344,318	434,27	319,859	228,01	454,168	231,309	452,009	125,498	113,455	185,708	371,126
DT	323,741	260,418	30,298	198,578	300,094	736,477	429,16	739,108	463,705	418,972	422,909	106,489
DY	85,244	250,615	269,609	192,791	7,927	472,809	165,492	475,44	189,197	144,464	159,241	147,964
E	177,884	61,233	190,02	3,715	200,933	660,385	353,068	663,016	309,747	267,177	346,817	191,659
EH	484,609	686,202	743,254	666,436	469,804	75,479	356,189	0	359,276	406,151	352,944	601,058
EM	218,17	68,563	255,522	65,69	227,412	636,2	379,616	634,041	307,772	267,757	373,365	266,02
EX	346,749	348,724	135,037	322,104	279,42	720,559	413,242	723,19	457,595	412,862	406,991	150,423
FK	508,088	705,741	758,453	681,635	485,003	38,419	371,388	41,592	378,814	425,689	368,143	616,257

	BarrowwUppon Soar	Cliffe	Poole	London	Birmingham	Glasgow	Liverpool	Edinburgh	Leeds	Sheffield	Manchester	Bristol
FY	224,835	448,08	475,2	398,382	201,75	313,76	88,135	316,391	137,809	145,808	84,89	333,004
G	496,262	693,915	746,627	669,809	473,177	20,885	359,562	73,645	366,988	413,863	356,317	604,431
GL	170,428	265,238	203,232	180,778	103,098	544,237	236,92	546,868	281,274	236,541	230,669	63,373
GU	187,897	167,965	130,206	83,505	164,25	623,702	316,385	626,333	327,861	283,128	310,134	109,333
HA	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
HD	173,105	374,698	459,816	350,239	210,404	325,207	112,378	327,838	18,649	74,103	66,777	341,658
HG	171,56	373,153	467,15	348,682	214,719	324,294	142,236	329,884	25,052	93,102	96,635	357,835
HP	133,508	135,169	193,707	82,292	138,13	597,582	290,265	600,213	267,534	222,801	284,014	159,758
HR	169,457	309,946	247,94	251,067	102,127	543,266	195,191	545,897	280,303	235,57	229,698	98,763
HU	151,018	350,839	466,928	326,38	214,485	419,452	196,593	378,077	90,782	99,93	150,992	357,601
HX	173,105	374,698	459,816	350,239	210,404	325,207	112,378	327,838	18,649	74,103	66,777	341,658
IG	218,17	68,563	255,522	65,69	227,412	636,2	379,616	634,041	307,772	267,757	373,365	266,02
IP	166,365	195,86	357,308	171,402	238,649	577,92	355,303	575,761	249,492	209,477	309,702	367,807
IV	742,816	940,469	993,181	916,363	719,731	273,148	606,116	251,792	613,542	660,417	602,871	850,985
KA	499,061	696,714	749,426	672,608	475,976	60,07	362,361	133,457	369,787	416,662	359,116	607,23
KT	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
KW	742,816	940,469	993,181	916,363	719,731	273,148	606,116	251,792	613,542	660,417	602,871	850,985
KY	565,328	762,981	815,693	738,875	542,243	106,38	428,628	54,519	436,054	482,929	425,383	673,497
L	178,342	401,586	428,706	351,888	155,256	367,491	5,115	370,122	116,472	122,927	53,569	286,51
LA	303,845	511,036	554,21	477,392	280,76	198,032	167,145	200,663	184,109	230,984	163,9	412,014
LD	173,306	365,512	391,925	315,107	120,181	461,3	120,517	463,931	210,635	197,845	141,287	251,435
LE	5,89	246,812	297,755	182,933	75,749	482,12	174,802	478,144	142,915	98,182	168,552	218,865
LL	243,345	466,589	493,709	416,891	220,259	451,347	89,524	453,978	200,682	187,892	131,334	351,513
LN	79,003	230,8	350,484	206,341	159,924	486,663	264,046	484,504	158,235	118,22	218,445	298,317
LS	173,105	374,698	459,816	350,239	210,404	325,207	112,378	327,838	18,649	74,103	66,777	341,658
LU	118,057	155,956	240,916	92,077	132,896	568,156	285,1	566,353	239,728	199,713	278,849	200,215
M	167,327	390,571	417,691	340,873	144,241	359,152	74,726	361,783	72,33	54,318	7,072	275,495
ME	249,662	25,963	228,308	61,221	279,145	692,049	431,28	689,89	363,621	323,606	425,029	261,267
MK	104,147	150,852	218,881	86,972	113,389	572,91	265,593	575,541	238,173	193,44	259,342	174,721
ML	455,394	653,047	705,759	628,941	432,309	49,323	318,694	53,533	326,12	372,995	315,449	563,563
N	177,884	61,233	190,02	3,715	200,933	660,385	353,068	663,016	309,747	267,177	346,817	191,659
NE	333,651	535,244	629,253	510,785	376,81	197,423	283,609	126,187	208,317	255,192	280,364	528,478
NG	79,003	230,8	350,484	206,341	159,924	486,663	264,046	484,504	158,235	118,22	218,445	298,317
NN	77,059	181,074	230,898	117,194	86,546	546,066	238,749	548,697	211,085	166,352	232,498	186,738
NP	237,255	338,761	192,881	254,302	169,925	611,064	250,236	613,695	348,101	303,368	297,496	82,62
NR	166,365	195,86	357,308	171,402	238,649	577,92	355,303	575,761	249,492	209,477	309,702	367,807
NW	177,884	61,233	190,02	3,715	200,933	660,385	353,068	663,016	309,747	267,177	346,817	191,659
OL	167,327	390,571	417,691	340,873	144,241	359,152	74,726	361,783	72,33	54,318	7,072	275,495

	BarrowwUppon Soar	Cliffe	Poole	London	Birmingham	Glasgow	Liverpool	Edinburgh	Leeds	Sheffield	Manchester	Bristol
OX	148,86	179,642	159,65	90,775	125,213	584,665	277,348	587,296	288,824	244,091	271,097	125,99
PE	129,83	127,104	269,748	102,645	160,069	569,135	312,272	566,976	240,707	200,692	306,021	280,247
PH	564,872	762,525	815,237	738,419	541,787	95,204	428,172	69,012	435,598	482,473	424,927	673,041
PL	480,44	482,415	268,728	455,795	413,111	854,25	546,933	856,881	591,286	546,553	540,682	284,114
PO	235,807	161,815	70,94	110,704	212,16	671,612	364,295	674,243	375,771	331,038	358,044	143,981
PR	235,807	161,815	70,94	110,704	212,16	671,612	364,295	674,243	375,771	331,038	358,044	143,981
RG	187,897	167,965	130,206	83,505	164,25	623,702	316,385	626,333	327,861	283,128	310,134	109,333
RH	200,976	100,54	141,641	50,367	204,357	663,809	356,492	666,44	335,002	290,269	350,241	162,513
RM	218,17	68,563	255,522	65,69	227,412	636,2	379,616	634,041	307,772	267,757	373,365	266,02
S	69,856	300,489	347,534	236,61	95,091	424,572	121,876	427,203	118,679	41,668	79,649	238,207
AS	355,651	425,979	280,099	341,52	288,321	601,359	260,576	603,99	350,694	421,764	281,346	169,838
SE	177,884	61,233	190,02	3,715	200,933	660,385	353,068	663,016	309,747	267,177	346,817	191,659
SG	118,057	155,956	240,916	92,077	132,896	568,156	285,1	566,353	239,728	199,713	278,849	200,215
SK	140,889	364,134	391,254	314,436	117,803	366,788	59,765	369,419	116,123	103,333	46,776	249,057
SL	133,508	135,169	193,707	82,292	138,13	597,582	290,265	600,213	267,534	222,801	284,014	159,758
SM	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
SN	148,86	179,642	159,65	90,775	125,213	584,665	277,348	587,296	288,824	244,091	271,097	125,99
SO	235,807	161,815	70,94	110,704	212,16	671,612	364,295	674,243	375,771	331,038	358,044	143,981
SP	323,741	260,418	30,298	198,578	300,094	736,477	429,16	739,108	463,705	418,972	422,909	106,489
SR	281,427	483,02	577,029	458,561	324,586	246,558	272,7	206,319	156,093	202,968	227,099	467,702
SS	218,17	68,563	255,522	65,69	227,412	636,2	379,616	634,041	307,772	267,757	373,365	266,02
ST	77,356	305,491	332,611	255,793	59,161	428,02	120,703	430,651	177,355	119,672	114,452	190,415
SW	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
SY	127,604	319,81	346,223	269,405	74,479	459,966	119,183	462,597	209,301	183,798	139,953	205,733
TA	277,863	289,41	104,115	253,218	210,534	651,673	344,356	654,304	388,709	343,976	338,105	81,537
TD	333,651	535,244	629,253	510,785	376,81	197,423	283,609	126,187	208,317	255,192	280,364	528,478
TF	127,604	319,81	346,223	269,405	74,479	459,966	119,183	462,597	209,301	183,798	139,953	205,733
TN	292,219	80,058	194,245	103,753	313,761	773,213	465,896	732,447	406,178	366,163	459,645	295,883
TQ	346,749	348,724	135,037	322,104	279,42	720,559	413,242	723,19	457,595	412,862	406,991	150,423
TR	480,44	482,415	268,728	455,795	413,111	854,25	546,933	856,881	591,286	546,553	540,682	284,114
TW	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
UB	190,191	51,766	189,937	10,599	214,264	673,716	366,399	676,347	341,252	279,484	360,148	196,572
W	177,884	61,233	190,02	3,715	200,933	660,385	353,068	663,016	309,747	267,177	346,817	191,659
WA	167,327	390,571	417,691	340,873	144,241	359,152	74,726	361,783	72,33	54,318	7,072	275,495
WD	151,379	102,047	211,994	41,368	160,62	602,321	312,824	600,162	273,893	233,878	306,573	222,493
WF	173,105	374,698	459,816	350,239	210,404	325,207	112,378	327,838	18,649	74,103	66,777	341,658
WN	167,327	390,571	417,691	340,873	144,241	359,152	74,726	361,783	72,33	54,318	7,072	275,495
WR	127,839	298,316	254,681	209,449	60,509	501,648	194,331	504,279	238,685	193,952	188,08	114,57

	BarrowwUppon Soar	Cliffe	Poole	London	Birmingham	Glasgow	Liverpool	Edinburgh	Leeds	Sheffield	Manchester	Bristol
WS	77,356	305,491	332,611	255,793	59,161	428,02	120,703	430,651	177,355	119,672	114,452	190,415
WV	85,244	250,615	269,609	192,791	7,927	472,809	165,492	475,44	189,197	144,464	159,241	147,964
YO	151,018	350,839	466,928	326,38	214,485	419,452	196,593	378,077	90,782	99,93	150,992	357,601

ANEXO B – Demanda dos nós

Nó	Demanda
AB	86,00
AL	1639,39
B	2707,87
BA	3623,60
BB	906,19
BD	447,33
BH	14444,20
BL	104,11
BN	7666,58
BR	2147,88
BS	1870,71
CA	267,37
CB	5914,33
CF	1730,43
CH	1049,23
CM	8942,81
CO	4977,91
CR	7491,17
CT	9475,98
CV	4000,89
CW	638,99
DA	4989,88
DD	9,35
DE	1902,79
DG	11,68
DH	196,99
DL	97,04
DN	4709,40
DT	846,77
DY	1428,32
E	842,32
EH	55,56
EN	1037,46
EX	3950,19
FK	21,69
FY	5,26
G	53,53
GL	3891,96

Nó	Demanda
GU	5190,20
HA	2680,10
HD	0,00
HG	46,02
HP	4007,00
HR	251,52
HU	1485,18
HX	539,09
IG	2220,06
IP	10271,19
IV	14,59
KA	66,49
KT	2859,48
KW	5,12
KY	32,34
L	388,39
LA	54,44
LD	91,62
LE	9284,72
LL	502,89
LN	3189,57
LS	1678,68
LU	1180,52
M	1029,93
ME	12891,35
MK	2331,82
ML	24,47
N	1623,31
NE	128,68
NG	6004,36
NN	3857,90
NP	527,49
NR	5774,26
NW	1536,96
OL	35,26
OX	9693,36
PE	6914,37
PH	71,96

Nó	Demanda
PL	3022,28
PO	10822,05
PR	682,52
RG	13125,38
RH	7334,49
RM	14231,50
S	4859,35
SA	743,80
SE	2682,23
SG	5280,06
SK	494,70
SL	6768,32
SM	1421,44
SN	5656,28
SO	8941,70
SP	3234,28
SR	42,79
SS	17133,21
ST	281,02
SW	1952,89
SY	224,94
TA	1530,22
TD	17,51
TF	814,13
TN	11775,42
TQ	444,19
TR	1117,50
TW	16566,17
UB	5165,32
W	178,89
WA	342,43
WD	1059,93
WF	1881,77
WN	14,39
WR	1093,59
WS	2103,01
WV	343,94
YO	1112,50

ANEXO C – Procedimento de otimização do Solver

Os procedimentos de otimização realizados nesse trabalho foram executados com o auxílio de um *add-in* do excel chamado *Solver*.

O Solver permite a otimização de diversos modelos matemáticos de acordo com as parametrizações inseridas pelo usuário.

A Figura 15 abaixo mostra a tela principal do *add-in*:

Os campos a serem preenchidos foram numerados a fim de explicar as informações que devem ser inseridas em cada campo.

A imagem mostra a janela "Parâmetros do Solver" com os seguintes elementos:

- 1 Definir Objetivo:** Campo de texto para a função objetivo.
- 2 Para:** Três opções de radio button: **Máx.** (selecionada), **Mín.**, e **Valor de:**. Um campo de texto ao lado contém o valor **0**.
- Alterando Células Variáveis:** Campo de texto para a célula da variável.
- 3** Campo de texto para a célula da variável.
- 4 Sujeito às Restrições:** Área com uma lista vazia e botões: **Adicionar**, **Alterar**, **Excluir**, **Redefinir Tudo**, e **Carregar/Salvar**.
- ☒ **Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas**
- 5 Selecionar um Método de Solução:** Menu suspenso com a opção **Evolutionary** selecionada. Botão **Opções** ao lado.
- Método de Solução:** Texto explicativo: "Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves."
- Botões na base: **Ajuda**, **Resolver** (destacado), e **Fechar**.

Figura 15 - Tela principal do *add-in*

Cada um dos campos foi preenchido de acordo com a função objetivo (Equação 3) e suas restrições.

1. O primeiro campo, "Definir objetivo" foi preenchido com a célula da planilha que calcula a soma de todos os custos de cada uma das fábricas. Isso fará com o que Solver faça a formulação tentando otimizar o valor dessa célula. Importante ressaltar que o valor da célula selecionada deve corresponder à função objetivo apresentada na Equação 3.
2. O segundo campo são botões de opções, onde é necessário informar o tipo de otimização a ser realizada. Para esse estudo especificamente, foi selecionado a opção de Minimizar, visto que o objetivo do procedimento é encontrar o menor custo mínimo total.
3. O terceiro campo a ser preenchido são as células variáveis. No problema das p medianas, as células variáveis se resumem à variável k_{ij} de cada uma das possíveis localizações. Sendo assim, foram selecionadas as células que correspondem à variável k_{ij} para cada uma das possíveis localizações. Isso possibilita o *add-in* variar essas células, de acordo com seu algoritmo interno, buscando o valor ótimo para a célula objetivo. Outro ponto a ser destacado é que as células variáveis deve necessariamente estar ligadas ao valor total da função objetivo.
4. O quarto campo enumera as restrições que devem ser consideradas no cálculo da otimização. Nesse estudo específico, duas restrições foram consideradas. A primeira restringiu o valor da variável k_{ij} para todas as localizadas para um valor binário. Em outras palavras, o solver só poderá alocar os valores 0 ou 1 para cada uma das células variáveis. A segunda restrição definir o valor da variável p . Definiu-se que os valores fixos que soma de todos os k_{ij} deveria resultar (3 na primeira otimização e 4 na segunda).
5. O quinto campo oferece a possibilidade de selecionar qual método o solver deve utilizar para buscar a otimização da função objetivo. Dentre as três opções oferecidas (LP Simplex, GRG Não Linear e Evolucionário), foi selecionado o método evolucionário, por apresentar melhores condições de cálculo.

A Figura 16 abaixo mostra a tela preenchida de forma completa:

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: ☐ Máx. ☒ Mín. ☐ Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

☒ Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Figura 16 - Tela preenchida de forma completa